

М.М. Комар

Вдосконалення концепції відмовостійкого керування повітряним судном

Показаны результаты компьютерного моделирования метода компенсации последствий отказов системы автоматического управления воздушным судном во время полета. Рассмотрены подход, основанный на методах теории абсолютной нелинейной инвариантности, и разработка систем автоматического управления воздушным судном с использованием теории абсолютной инвариантности, что позволит реализовать эффективный метод управления судном.

Ключевые слова: отказ, реконфигурация, управление, самолет, инвариантность.

Показано результати комп'ютерного моделювання методу компенсації наслідків відмов системи автоматичного керування повітряним судном під час польоту. Розглянуто підхід, заснований на методах теорії абсолютної нелінійної інваріантності і розробку систем автоматичного керування повітряним судном з використанням теорії абсолютної інваріантності, яка дозволить реалізувати ефективний метод керування повітряним судном.

Ключові слова: відмова, реконфігурація, керування, літак, інваріантність.

Вступ. Аналіз розподілу інцидентів з літаками світової комерційної цивільної авіації за даними Міжнародної організації цивільної авіації (*International Civil Aviation Organisation – ICAO*) [1] дозволяє виділити із загального числа авіаційних пригод (АП), які відбулися у світі з 2008 по 2016 рр. (рис. 1), три основні категорії. *Перша* – події, які відбуваються на злітно-посадковій смузі (ЗПС) – фактори, які впливають на безпеку на ЗПС (*RS*). *Друга* – зіткнення з землею (коли повністю функціонально справний літак вривається в землю внаслідок помилки пілота через втрату просторової орієнтації (*CFIT*)). *Третя* причина – несправність системи автоматичного керування (САК) літаком внаслідок відмов, що призводить до втрати контролю над літаком у польоті (*LOC-I*). Статистика за трьома основними категоріями причин авіаційних пригод представлена на рис. 2.

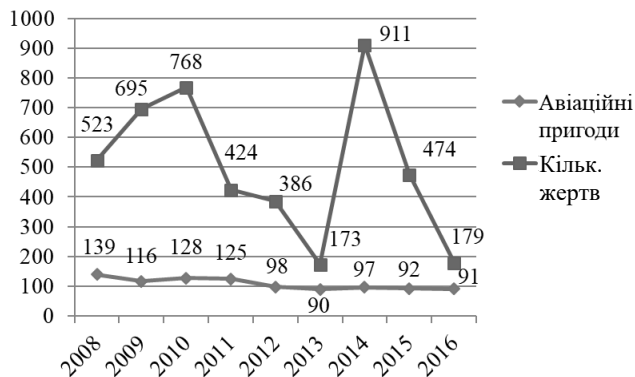


Рис. 1

ICAO встановлює пріоритети в трьох сферах гарантії безпеки польотів: підвищення безпеки

операцій на ЗПС, скорочення кількості авіаційних пригод унаслідок зіткнення справного повітряного судна з землею та скорочення кількості авіаційних пригод та інцидентів, пов'язаних з втратою керування в польоті.

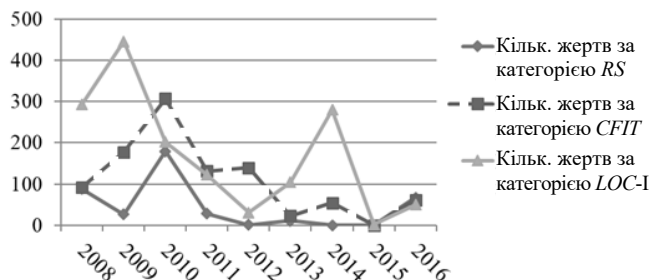


Рис. 2

Категорія *LOC-I* викликає найбільшу стурбованість, оскільки на неї припадає 20 відсотків катастроф у світі, та найбільша кількість жертв (22 відсотки від загальної кількості жертв).

Аналіз доступної статистики авіаційних пригод з комерційними повітряними суднами (ПС) країн СНД також підтверджує той факт, що найбільший вплив на стан безпеки польотів літаків країн СНД при виконанні комерційних перевезень пасажирів і вантажів мають авіаційні пригод, пов'язані з втратою керуваності в польоті (всі авіаційні пригод закінчилися катастрофами), зіткненням із землею в керованому польоті (12 пригод), викочуванням за межі ЗПС, а також відмовами силової установки (10 пригод).

Розподіл інцидентів з літаками комерційної авіації країн СНД, що відбулися протягом

2015 р., за типами пригод, з якими вони були пов'язані, наведено на рис. 3.



Рис. 3

У 2015 р. відбулося 365 інцидентів, пов'язаних з відмовами систем літака (290 інцидентів, в тому числі чотири серйозних) і силової установки (75 інцидентів, з яких – два серйозних).

Постановка задачі

З аналізу статистики АП можна зробити висновки, що основними причинами АП як за кордоном, так і на території СНД є пригоди на злітно-посадковій смугі, зіткнення ПС із землею і втрата контролю над літаком в польоті. За статистикою втрата контролю над літаком у повітрі відбувається через відмови системи керування ПС, що найчастіше призводить до катастроф. Ця категорія є найбільшою за кількістю жертв. ICAO ставить пріоритетні завдання забезпечення відмовостійкого керування ПС, вирішення яких сприятиме зниженню ризиків авіаційних пригод, пов'язаних з категорією LOC-I, що в свою чергу приведе до підвищення безпеки польотів у цивільній авіації в цілому.

Аналіз новітніх досліджень та публікацій

Системні методи відновлення живучості ПС в особливих ситуаціях у польоті в результаті пошкоджень зовнішніх обводів і керуючих поверхонь викладено у [2, 3]. Методи алгоритмічного забезпечення відмовостійкості систем автоматичного керування шляхом перетворення структури системи з додаванням до неї пристроїв і зв'язків так, що видозмінюється алгоритм управління системою, розглянуто у [4, 5]. Методи аналізу на основі моделей для діагнос-

тики несправностей і відмовостійкого керування подано у [6]. Відзначимо, що описані методи предметно орієнтовані на певний характер збурень, які підлягають компенсації. Методи, розроблені для лінійних систем, мають наочно виражений недолік, пов'язаний з тривалою адаптацією, співрозмірний з витратами часу на виконання операцій системою, яка відмовила. У доступній літературі не згадується про можливість одночасної компенсації відмов авіаційної техніки (АТ) і компенсації впливів турбулентної атмосфери. Не висвітлено питання компенсації комбінації двох і більше відмов у різних контурах САК, наприклад, одночасна відмова двигуна і поверхонь керування або елементів механізації крила.

Незважаючи на численні наукові публікації, застосування відмовостійкого керування поки що дуже обмежене. Отже, сьогодні стоїть актуальне наукове завдання розробки і удосконалення методів відмовостійкого керування ПС за умов турбулентної атмосфери і впливів від збурень, викликаних відмовами авіаційної техніки.

Мета статті – розробка і комп'ютерне моделювання методу інваріантного керування ПС за виникнення відмов системи керування.

Забезпечення відмовостійкого керування повітряним судном

Одним із сучасних засобів забезпечення відмовостійкості і живучості ПС є реконфігурація, тобто цілеспрямована зміна взаємозв'язку між елементами системи та підсистемами літака, що здійснюється з метою збереження його працездатності за відмов окремих елементів і підсистем [7].

Реконфігурація системи автоматичного керування літаком за відмов приводів та органів керування полягає в перерозподілі керування на справні органи з метою створення необхідних керуючих сил і моментів та збереження прийнятної якості та стійкості керування (рис. 4).

Запропонований метод компенсації відмов системи керування літальним апаратом передбачає можливість компенсації негативного впливу наслідків відмов і зовнішніх збурень. Метод заснований на реконфігурації системи керування створенням аеродинамічних сил і моментів

шляхом залучення всіх основних і додаткових рульових поверхонь – керма висоти, елеронів, закрилків, щілини та ін.) і силовою установкою ПС. Подібна технологія з використанням реконфігурації САК має назву *CCV (Control Configured Vehicle)* – літак з конфігурацією, яка визначається системою керування.

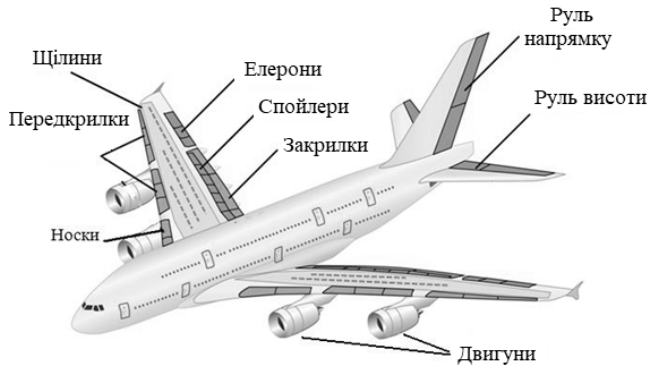


Рис. 4

До основних проблем сучасної авіації відносять проблему високоефективного комп'ютерного керування ПС з метою реалізації алгоритму використання всіх можливостей, закладених в його конструкцію.

Вирішення зазначеного завдання пов'язане з необхідністю використання нелінійних закономірностей, закладених в характеристики керованих систем.

Характеристики літаків у всій галузі їх визначення, як правило, мають складний нелінійний характер і характеризуються наявністю статичної та динамічної невизначеності і критичних точок, що є особливим ускладненням.

Складність створення алгоритмів керування такими об'єктами в цілому призвело до того, що в основному в класичній постановці ці закони алгоритмізуються тільки в лінійних областях, тобто в обмеженнях, близьких до певних статичних режимів. У системному розумінні це означає, що не всі можливості і стани об'єкта (літака) використовуються за класичного функціонування керованої системи. Ці невикористані можливості нелінійного об'єкта створюють так звані нелінійні технологічний ресурс системи, застосування якого дозволило б керувати повітряним судном у нелінійних режимах [8]. Саме тому особливо актуальною є

проблема вдосконалення існуючих методів відмовостійкого керування ПС з використанням нелінійного функціонального ресурсу літака.

При класифікації відмов АТ за наслідками можуть бути введені дві, три і більше категорій відмов. У міжнародних документах *ІКАО* розрізняють критичні і некритичні відмови. Останні поділяють на суттєві і несуттєві.

Приклади компенсації деяких поширених відмов АТ, які виникають на борту ПС, за допомогою реконфігурації системи керування і застосування технології *CCV* зведено у таблицю.

Відмови на борту ПС та приклад їх компенсації

Тип відмови	Описання відмови і її наслідків	Варіант реконфігурації САК	Критичність відмови
Блокування руля висоти	Секції руля висоти блокуються в несправному стані зі зміщенням від лінії тримрування	Решта поверхонь: стабілізатор, елерони (симетричне відхилення), закрилки, щілини	Суттєва, некритична
Блокування елерона	Елерон блокується в несправному стані зі зміщенням від лінії тримрування	Решта справних поверхонь: справні елерони, спойлери	Суттєва, некритична
Відмова горизонтального стабілізатора	Поверхня стабілізатора швидко рухається в крайнє положення і не реагує на команди керування	Решта справних поверхонь: кермо висоти, елерони (симетричне відхилення), закрилки, щілини	Критична
Відмова руля напрямку	Секції руля напрямку швидко переміщуються в крайнє положення	Решта справних поверхонь керування і асиметрична тяга двигунів	Критична
Пошкодження обводів вертикального оперення	Втрата вертикального оперення призводить до втрати всіх поверхонь керування руля напрямку, а також до втрати всіх механізмів демпфування в каналах крену і ристання.	Решта справних поверхонь керування і асиметрична тяга двигунів	Катастрофічна
Відмова двигуна	Виникнення несиметричності тяги	Доступні справні поверхні керування і двигуни	Катастрофічна

Математична постановка і розв'язання задачі синтезу автоматичної системи керування кутами орієнтації літака із застосуванням методу, заснованого на теорії абсолютної нелінійної інваріантності подано у [9]. Далі наведено результати моделювання розробленого ме-

тоту. Використано модель гіпотетичного літака з розвиненою механізацією крила, який має надлишкові органи керування для здійснення реконфігурації в разі виникнення відмов з бібліотеки *Airlib* – це бібліотека моделей повітряних суден, яка використовується в *Matlab Simulink*. Моделі значною мірою засновані на блоках з панелі інструментів *Aerospace Blockset*. Тип літака повністю визначається інерційними і аеродинамічними параметрами. В моделі для графічного відображення доступні сигнали кутів відхилення елеронів, закрилків, спойлерів, секцій керма висоти, керма напрямку, кути установки стабілізатора (рис. 5). Розглянуто випадки звичайного польоту за маршрутом без відмов та відмова горизонтального стабілізатора. Виникнення відмови задано на 50 с польоту.

Політ за маршрутом без відмов

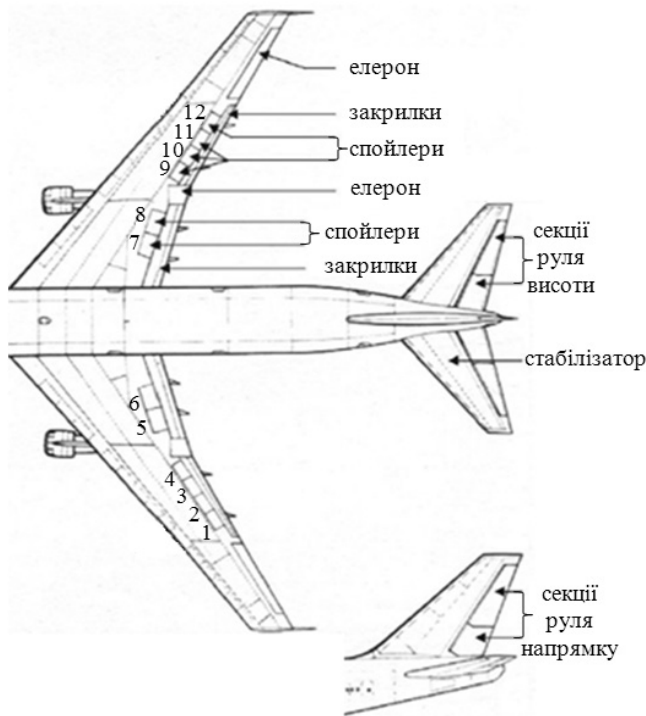


Рис. 5

Для відстеження величини відхилень аеродинамічних поверхонь керування промодельовано маневр зі зміною наступних параметрів моделі: набору висоти до значення 5 тис. м на 80 секунд, зміна швидкості на 50 м/с на 110 секунд моделювання. Цей випадок дозволяє

продемонструвати зв'язок між основними каналами керування літаком, використаними в моделі. Зміни висоти і швидкості представлені на рис. 6.

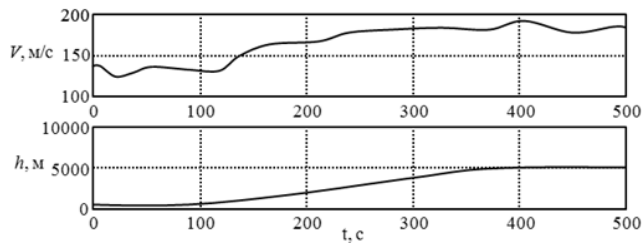


Рис. 6.

На графіках зміни положення поверхонь керування показано відхилення секцій керма висоти (див. рис. 7, а), які використовуються для набору висоти (рис. 7 і 8) Закрилки і щілини відхиляються синхронно для керування підйомною силою і зміни висоти польоту (див. рис. 7, б, в). Можна також відзначити відхилення спойлерів № 1–6, а та № 7–12, б для компенсації зростання швидкості (див. рис. 8).

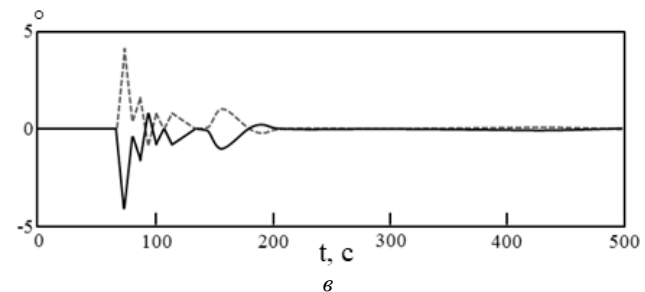
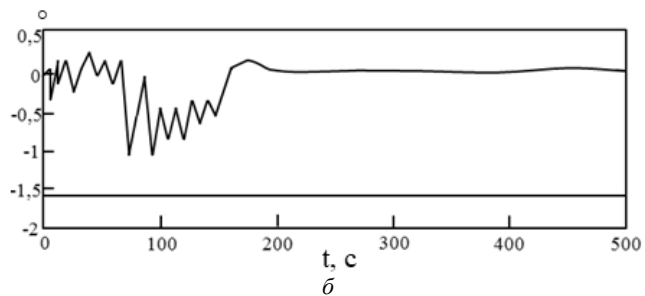
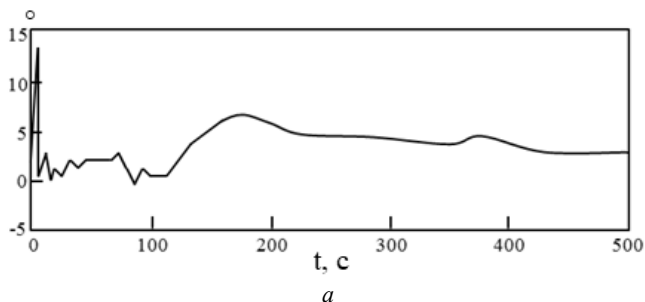


Рис. 7

Відмова горизонтального стабілізатора

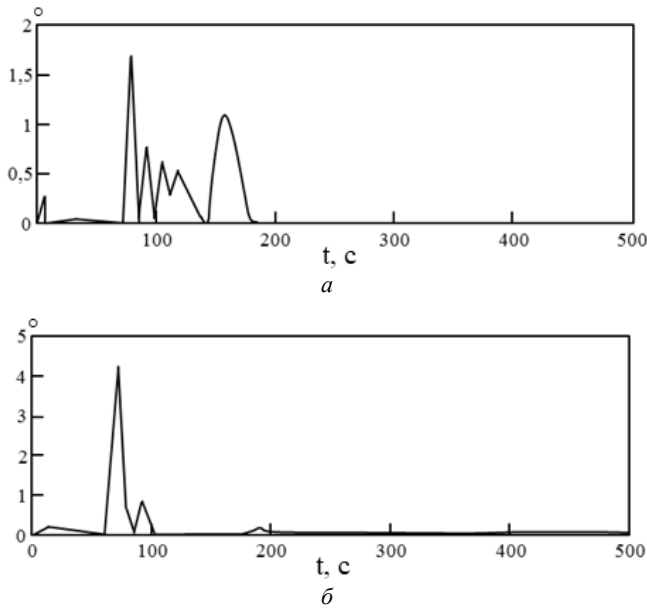


Рис. 8

Відмова стабілізатора належить до критичних відмов, але може бути компенсована реконфігурацією системи керування. В даному конкретному випадку розглянуто відмову горизонтального стабілізатора повітряного судна, коли він на максимальній швидкості з положення $-1,6^\circ$ відхиляється в положення $0,4^\circ$ і залишається в цьому положенні без реакції на команди керування. Збурення, викликане цією відмовою, компенсується відхиленням секцій керма висоти. Сценарій польоту такий самий, як і для польоту без відмов (рис. 9).

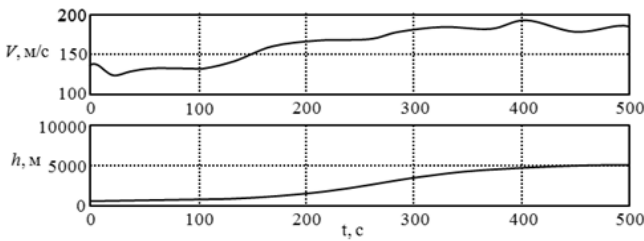


Рис. 9

Відхилення стабілізатора зображено на рис. 10. Зміни висоти і швидкості відпрацьовуються без будь-яких погіршень продуктивності навіть при залученні керма висоти для компенсації відмови стабілізатора (див. рис. 9). Це досягається завдяки розвантаженню основних поверхонь керування шляхом гнучкого викорис-

тання додаткових керуючих поверхонь, які також використовуються для зміни висоти польоту (рис. 10, а, б, в і 11).

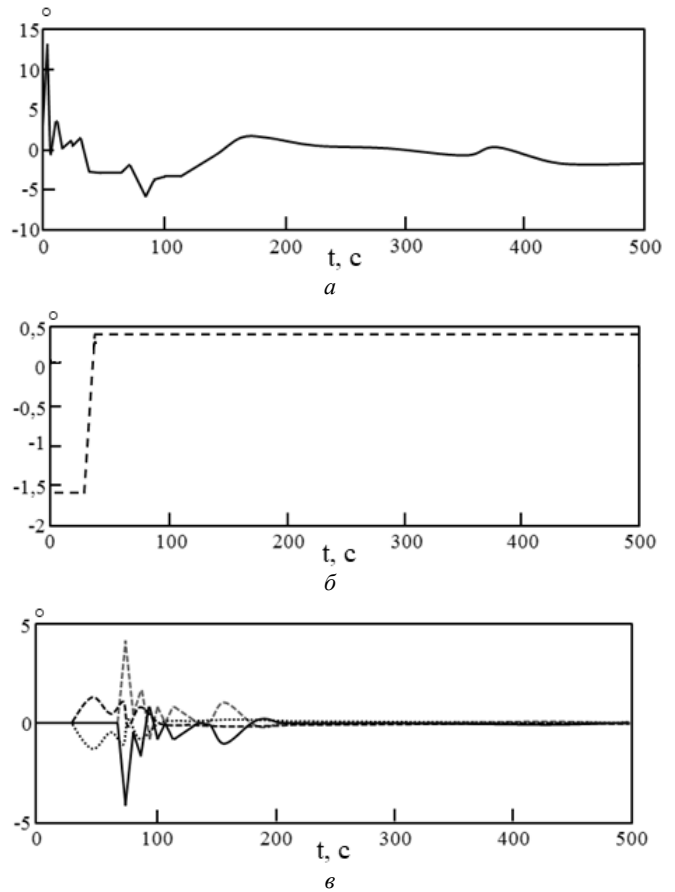


Рис. 10

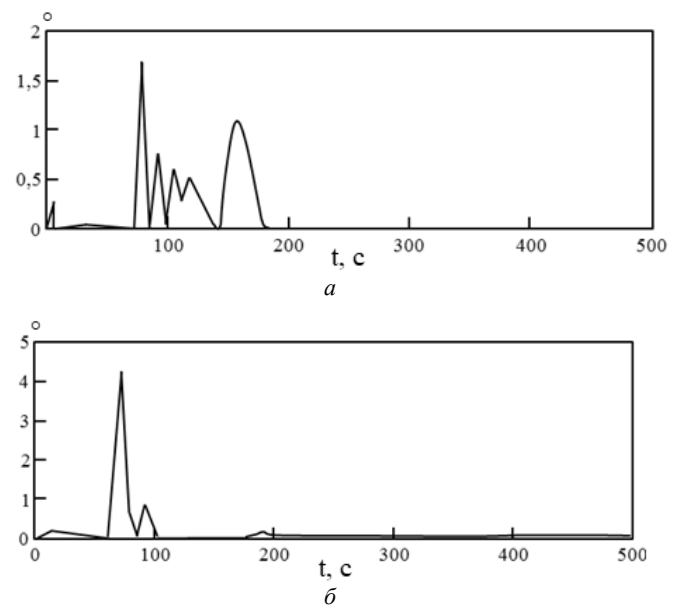


Рис. 11

Висновки. З викладеного випливає, що проблема гарантії безпеки польотів у цивільній авіації була і буде одним з пріоритетних напрямків роботи ICAO. Завдання відмовостійкого керування ПС сформульоване світовими вченими, але на сьогодні його остаточне вирішення відсутнє.

Як показали результати моделювання, при використанні розробленого методу інваріантного керування повітряним судном зміна висоти і швидкості відпрацьовується без будь-яких погіршень продуктивності як для випадку відсутності відмов у системі автоматичного керування, так і для випадку відмови горизонтального стабілізатора, яка належить до класу критичних відмов. Результати моделювань розробленого методу показали його ефективність: при застосуванні методу зберігається прийнятна динаміка керованого руху літака за виникнення відмови, близька до реакції літака за польоту у справному стані без відмов.

Метод забезпечує компенсацію наслідків дії відмов аеродинамічних органів керування в межах наявних аеродинамічних і функціональних можливостей літального апарату, що дозволяє забезпечити комфорт пасажирів, зменшити навантаження на екіпаж при компенсації відмов авіаційної техніки, що в свою чергу за-

безпечить зниження впливу людського чинника на безпеку польотів.

1. *Accident Statistics* – ICAO. URL: <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx>
2. Шевчук Д.О. Концепция реконфигурации управления для восстановления управляемости и устойчивости самолета в отказных ситуациях // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 744. – С. 204–208.
3. Казак В.М. Системні методи відновлення живучості літальних апаратів в особливих ситуаціях у польоті. – К.: НАУ-друк, 2010. – 284 с.
4. Живов Ю.Г., Поединок А.М. Адаптивная система управления продольным движением самолета // Ученые записки ЦАГИ. – 2012. – № 5. – С. 91–104.
5. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 546 с.
6. Blanke M., Kinnaert M., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. – Berlin: Springer, 2003. – 571 p.
7. Жулев В.И., Иванов В.С. Безопасность полетов летательных аппаратов: Теория и анализ. – М.: Транспорт, 1986. – 224 с.
8. Павлова С.В. Топологична оцінка функціональності якості керованої аеродинамічної системи літака // Вісн. Нац. авіаційного ун-ту. – 2005. – № 1. – С. 48–54.
9. Pavlova S., Komar N. The Invariant Adaptation of the Aircraft Control System in Emergency Situation During the Flight // Proc. of the National Aviation University. – 2016. – № 4(69). – P. 28–33.

Поступила 12.10.2017
Тел. для справок: +38 044 526-0158 (Київ)
E-mail: nickkomar08@gmail.com
© Н.Н. Комар, 2017

Н.Н. Комар

Усовершенствование концепции отказоустойчивого управления воздушным судном

Введение. Анализ распределения инцидентов с самолетами мировой коммерческой гражданской авиации по данным Международной организации гражданской авиации ICAO [1] позволяет выделить из общего числа авиационных происшествий (АП) в мире с 2008 по 2016 гг. (рис. 1) три основных категории. *Первая* – это события, происходящие на взлетно-посадочной полосе (ВПП) – ряд факторов, влияющих на безопасность (RS). *Вторая* – столкновения с землей (когда полностью функционально исправный самолет врезается в землю в результате ошибки пилота при потере пространственной ориентации (CFIT)). *Третья* причина – неисправность системы автоматического управления (САУ) самолетом вследствие отказов, которая приводит к потере контроля над самолетом в полете (LOC-I). Статистика по трем основ-

ным категориям причин авиационных происшествий представлена на рис. 2.

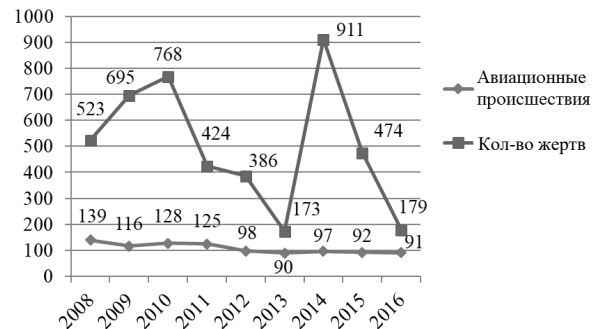


Рис. 1

ICAO устанавливает приоритеты в трех сферах обеспечения безопасности полетов: повышение безопасности операций на ВПП, сокращение количества авиационных происшествий в результате столкновения исправного воздушного судна с землей и сокращения количества авиационных происшествий и инцидентов, связанных с потерей управления в полете.

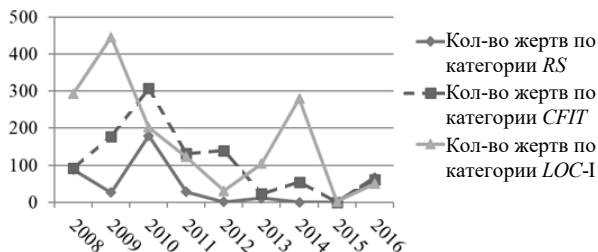


Рис. 2

Категория LOC-I вызывает наибольшую обеспокоенность, так как на нее приходится 20 процентов катастроф в мире, и наибольшее количество жертв – 22 процента от общего количества.

Анализ доступной статистики авиационных происшествий с коммерческими воздушными судами (ВС) стран СНГ также подтверждает тот факт, что наибольшее влияние на состояние безопасности полетов самолетов СНГ при выполнении коммерческих перевозок пассажиров и грузов имеют авиационные происшествия, связанные с потерей управляемости в полете (все авиационные происшествия закончились катастрофами), столкновением с землей в управляемом полете (12 происшествий), выкатыванием за пределы ВПП, и отказами силовой установки (10 происшествий).

Распределение инцидентов с самолетами коммерческой авиации стран СНГ, произошедших в 2015 г., по типам происшествий, с которыми они были связаны, приведены на рис. 3.

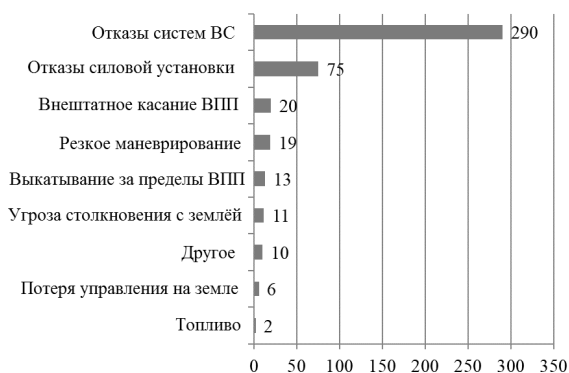


Рис. 3

В 2015 г. произошло 365 инцидентов, связанных с отказами систем самолета (290 инцидентов, в том числе четыре серьезных) и силовой установки (75 инцидентов, в том числе два серьезных).

Постановка задачи

Из анализа статистики АП можно сделать вывод, что основными их причинами как за рубежом, так и на территории СНГ являются происшествия на взлетно-посадочной полосе, столкновения ВС с землей и потеря контроля над самолетом в полете. Согласно статистике, потеря контроля над самолетом в воздухе происходит вследствие отказа системы управления ВС, и чаще всего приводит к катастрофам. Эта категория – крупнейшая по количеству жертв. ICAO ставит приоритетные задачи обеспечения отказоустойчивого управления ВС, решение которых будет способствовать снижению рисков авиационных происшествий, связанных с категорией LOC-I, что, в свою очередь, приведет к повышению безопасности полетов в гражданской авиации в целом.

Анализ новейших исследований и публикаций

Системные методы восстановления живучести ВС в особых ситуациях в полете в результате повреждений внешних обводов и управляющих поверхностей изложены в [2, 3]. Методы алгоритмического обеспечения отказоустойчивости систем автоматического управления путем преобразования структуры системы с добавлением к ней устройств и связей так, что видоизменяется алгоритм управления системой рассмотрены в [4, 5]. Методы анализа на основе моделей для диагностики неисправностей и отказоустойчивого управления приведены в [6]. Отметим, что описанные методы предметно ориентированы на определенный характер возмущений, подлежащих компенсации. Методы, разработанные для линейных систем, имеют явно выраженный недостаток, связанный с длительным процессом адаптации, соразмерным с затратами времени на выполнение операций отказавшей системой. В доступной литературе не упоминается о возможности одновременной компенсации отказов авиационной техники (АТ) и компенсации воздействий турбулентной атмосферы. Не отражен вопрос компенсации комбинации двух и более отказов в различных контурах САУ, например, одновременный отказ двигателя и поверхностей управления или элементов механизации крыла.

Несмотря на многочисленные научные публикации, применение отказоустойчивого управления пока очень ограничено. Таким образом, сегодня актуальна научная задача разработки и совершенствования методов отказоустойчивого управления ВС в условиях турбулентной атмосферы и воздействий от возмущений, вызванных отказами авиационной техники.

Цель статьи – разработка и компьютерное моделирование метода инвариантного управления ВС при возникновении отказов системы управления.

Обеспечение отказоустойчивого управления воздушным судном

Одним из современных средств обеспечения отказоустойчивости и живучести ВС является реконфигурация, т.е. целенаправленное изменение взаимосвязи между элементами системы и подсистемами самолета, кото-

рая осуществляется с целью сохранения его работоспособности при отказах отдельных элементов и подсистем [7].

Реконфигурация системы автоматического управления самолетом при отказах приводов и органов управления заключается в перераспределении управления на исправные органы с целью создания необходимых управляющих сил и моментов и сохранения приемлемого качества и устойчивости управления (рис. 4).



Рис. 4

Предложенный метод, основанный на реконфигурации системы управления созданием аэродинамических сил и моментов путем использования всех основных и дополнительных рулевых поверхностей (руль высоты, элероны, закрылки, щели и др.) и силовой установки ВС, предусматривает возможность компенсации негативного влияния последствий отказов и внешних возмущений. Подобная технология с использованием реконфигурации САУ называется *CCV (Control Configured Vehicle)* – самолет с конфигурацией, определяемой системой управления.

К основным проблемам современной авиации относят высокоэффективное компьютерное управление воздушным судном с целью реализации алгоритма использования всех возможностей, заложенных в его конструкцию.

Решение данной проблемы связано с необходимостью использования нелинейных закономерностей, заложенных в характеристики управляемых систем.

Характеристики самолетов во всей области их определения, как правило, имеют сложный нелинейный характер и характеризуются наличием статической и динамической неопределенности и критических точек, что особенно усложняет ситуацию.

Сложность создания алгоритмов управления такими объектами в целом привело к тому, что в основном в классической постановке законы управления такими объектами алгоритмируются только в линейных областях, т.е. в ограниченных областях, близких к некоторым статическим режимам. В системном смысле это означает, что не все возможности и состояния самолета используются при классическом функционировании управляемой системы. Эти неиспользуемые возможности нелинейного объекта создают так называемый нелиней-

ный технологический ресурс системы, применение которого позволило бы управлять воздушным судном в нелинейных режимах [8]. Именно поэтому особенно актуальна проблема совершенствования существующих методов отказоустойчивого управления ВС с использованием нелинейного функционального ресурса самолета.

При классификации отказов АТ по последствиям могут быть введены две, три и более категорий отказов. В международных документах *ICAO* различают критические и некритические отказы – существенные и несущественные.

Примеры компенсации некоторых распространенных отказов АТ, возникающих на борту ВС, с помощью реконфигурации системы управления и применения технологии *CCV* приведены в таблице

Отказы на борту ВС и пример их компенсации

Тип отказа	Описание отказа и его последствий	Вариант реконфигурации САУ	Критичность отказа
Блокирование руля высоты	Секции руля высоты блокируются в неисправном состоянии со смещением от линии триммирования	Остальные поверхности: стабилизатор, элероны (симметричное отклонение), закрылки, щели	Существенный, некритический
Блокирование элерона	Элерон блокируется в неисправном состоянии со смещением от линии триммирования	Остальные исправные поверхности: элероны, спойлеры	Существенный, некритический
Отказ горизонтального стабилизатора	Поверхность стабилизатора быстро движется в крайнее положение и не реагирует на команды управления	Остальные исправные поверхности: руль высоты, элероны (симметричное отклонение), закрылки, щели	Критический
Отказ руля направления	Секции руля направления быстро перемещаются в крайнее положение	Остальные исправные поверхности управления и асимметричная тяга двигателей	Критический
Повреждение обводов вертикального оперения	Потеря вертикального оперения приводит к потере всех поверхностей управления руля направления, а также к потере всех механизмов демпфирования в каналах крена и рыскания.	Остальные исправные поверхности управления и асимметричная тяга двигателей	Катастрофический
Отказ двигателя	Возникновение несимметричности тяги при отказе двигателя	Доступные исправные поверхности управления и двигателя	Катастрофический

Математическая постановка и решение задачи синтеза автоматической системы управления углами ориен-

тации самолета с применением метода, основанного на теории абсолютной нелинейной инвариантности приведена в [9]. Далее показаны результаты моделирования разработанного метода. Использована модель гипотетического самолета с развитой механизацией крыла, который имеет избыточные органы управления для осуществления реконфигурации в случае возникновения отказов из библиотеки *Airlib* – это библиотека моделей воздушных судов, используемая в *Matlab Simulink*. Модели в значительной степени основаны на блоках с панели инструментов *Aerospace Blockset*. Тип самолета определяется инерционными и аэродинамическими параметрами. В модели для графического отображения доступны сигналы углов отклонения элеронов, закрылков, спойлеров, секций руля высоты, руля направления, углы установки стабилизатора (рис. 5). Рассмотрены случаи обычного полета по маршруту без отказов и отказ горизонтального стабилизатора. Возникновение отказа задано на 50 с полета.

Полет по маршруту без отказов



Рис. 5

Для отслеживания размеров отклонений аэродинамических поверхностей управления промоделирован маневр с изменением следующих параметров модели: набор высоты до значения 5 тыс. м на 80 с, изменение скорости на 50 м/с на 110 с моделирования. Этот случай позволяет продемонстрировать связь между основными каналами управления самолетом, использованными в модели. Изменения высоты и скорости представлены на рис. 6.

На графиках изменения положения поверхностей управления показано отклонение секций руля высоты (рис. 7, а), которые используются для набора высоты (рис. 7 и 8). Закрылки и щели отклоняются синхронно

для управления подъемной силой и изменения высоты полета (см. рис. 7, б, в). Можно также отметить отклонения спойлеров № 1–6, а и № 7–12, б для компенсации повышения скорости (см. рис. 8).

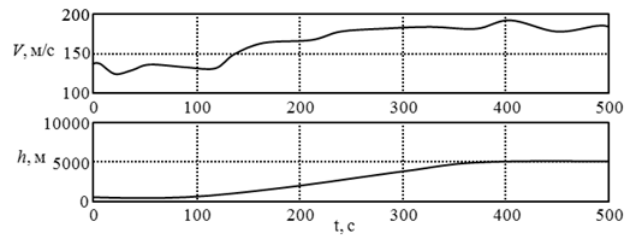


Рис. 6

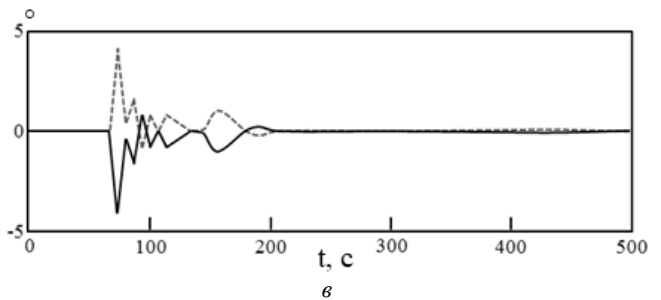
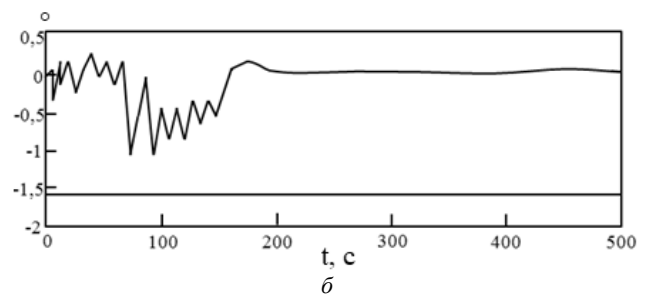
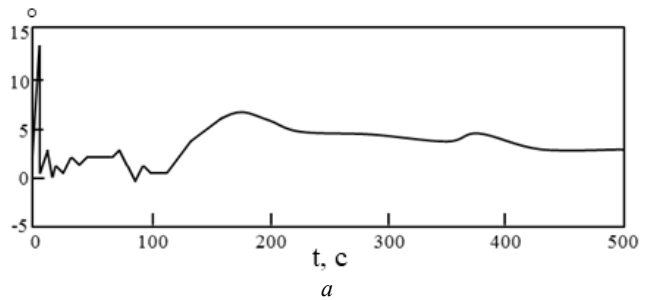
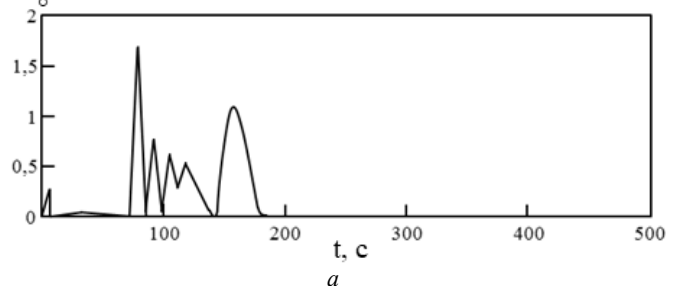


Рис. 7

Отказ горизонтального стабилизатора



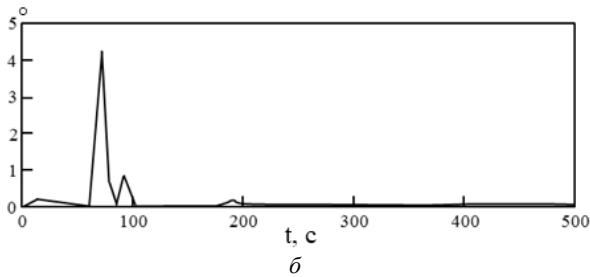


Рис. 8

Отказ стабилизатора относится к критическим отказам, но может быть компенсирован посредством реконфигурации системы управления. В данном конкретном случае рассмотрен отказ горизонтального стабилизатора воздушного судна, когда он на максимальной скорости из положения $-1,6^\circ$ отклоняется в положение $0,4^\circ$ и остаётся в этом положении без реакции на команды управления. Отклонение стабилизатора изображено на рис. 10. Возмущение, вызванное этим отказом, компенсируется отклонением секций руля высоты. Сценарий полёта такой же, как и для полёта без отказов (рис. 9).

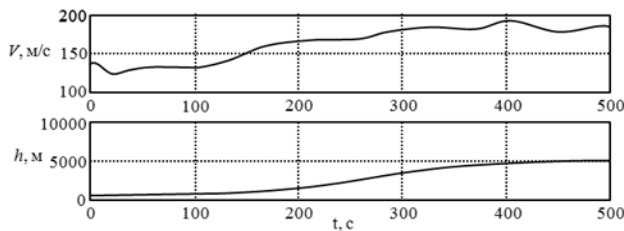


Рис. 9

Изменения высоты и скорости обрабатываются без каких-либо ухудшений производительности даже при привлечении руля высоты для компенсации отказа стабилизатора (см. рис. 9). Это достигается разгрузкой основных поверхностей управления путем гибкого использования дополнительных управляющих поверхностей, которые также используются для изменения высоты полета (рис. 10 и 11).

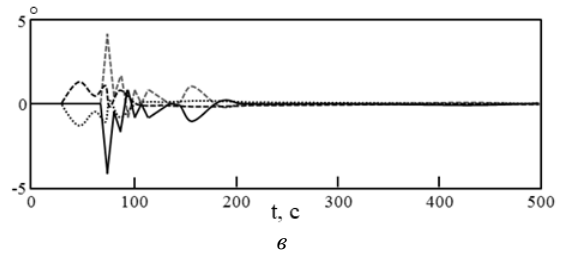
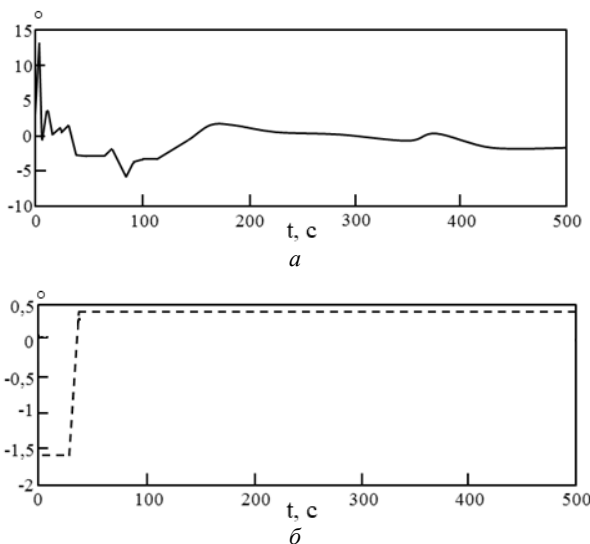


Рис. 10

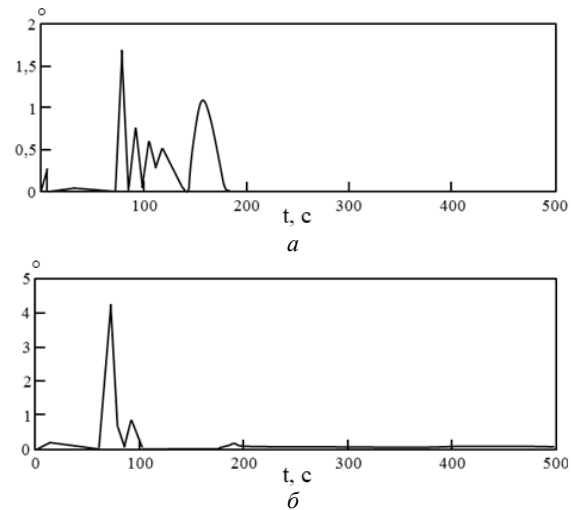


Рис. 11. Отклонение секций спойлеров № 1–6, а и № 7–12, б для случая компенсации отказа горизонтального стабилизатора

Заключение. Из изложенного следует, что проблема обеспечения безопасности полетов в гражданской авиации была и будет одним из приоритетных направлений работы ICAO. Задача отказоустойчивого управления ВС сформулирована учеными мира, но на сегодня ее окончательное решение отсутствует.

Как показали результаты моделирования, при использовании разработанного метода инвариантного управления воздушным судном изменение высоты и скорости обрабатывается без каких-либо ухудшений производительности как для случая отсутствия отказов в системе автоматического управления, так и для случая отказа горизонтального стабилизатора, который относится к классу критических отказов. Результаты моделирования разработанного метода показали его работоспособность. При использовании метода сохраняется приемлемая динамика управляемого движения самолета при возникновении отказа, близкая к реакции самолета в полете без отказов.

Метод обеспечивает компенсацию последствий отказов аэродинамических органов управления в пределах имеющихся аэродинамических и функциональных возможностей летательного аппарата, позволяющих обеспечить комфорт пассажиров, уменьшить нагрузку на экипаж при компенсации отказов авиационной техники, что в свою очередь приведет к снижению влияния человеческого фактора на безопасность полетов.

Research fellow, Department of intelligent control, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine. E-mail: nickkomar08@gmail.com

The Concept of the Aircraft Fault-Tolerant Control Improvement

Keywords: failure, reconfiguration, control, aircraft, absolute non-linear invariance

Purpose: The aim of this study is to demonstrate the results of computer simulation of the method for compensating the effects of the aircraft automatic control system failures during the flight.

Methods: An approach is based on the methods of theory of absolute nonlinear invariance.

Results: The simulation results of the horizontal stabilizer failure compensation are presented. The accident and fatality statistics from 2008 to 2016 are offered. The concept of aircraft fault tolerant control is described.

Discussion: The use of the reconfiguration of the aircraft control system to guarantee its survivability during the flight is a perspective direction. However, the development of the concept of the aircraft motion control using the theory of absolute invariance allows to implement an effective developed aircraft control method that has more advantages compared with the existing methods.

Conclusion: The method provides compensation for the consequences of the aerodynamic control system failures within the existing aerodynamic and functional capabilities of the aircraft, which ensures passengers comfort during the flight, reduces the load on the crew, which in its turn decreases the impact of the human factor on the flight safety in general.

1. *Accident Statistics* – ICAO. URL: <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx>
2. *Shevchuk D.O.* (2012) Kontseptsiya rekonfiguratsii upravleniya dlya vosstanovleniya upravlyaemosti i ustoychivosti samoleta v otkaznykh situatsiyakh [The concept of control reconfiguration to restore the controllability and stability of the aircraft in cases of failures]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnikha»*, no. 744, pp. 204–208. (In Russian).
3. *Kazak V.M.* (2010) Systemni metody vidnovlennia zhyvuchosti litalnykh aparativ v osoblyvykh sytuatsiyakh u poloti [System methods for aircraft survivability recovery in special situations in flight]. Kyiv, Vydavnytstvo Natsionalnoho aviatsiynoho universytetu «NAU-druk» Publ., 284 p. (in Ukrainian).
4. *Zhivov Yu.G., Poedinok A.M.* (2012) Adaptivnaya sistema upravleniya prodol'nym dvizheniem samoleta [Adaptive control system of the aircraft longitudinal motion]. *Uchenye zapiski TsAGI*, no. 5, pp. 91–104. (In Russian).
5. *Fomin V.N.* (1981) Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob"ektami [Adaptive control of dynamic objects]. Moscow, Nauka Publ., 546 p. (In Russian).
6. *Blanke M., Kinnaert M., Staroswiecki M.* (2003) *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin, Springer, 571 p.
7. *Zhulev V.I., Ivanov V.S.* (1986) Bezopasnost' poletov letatel'nykh apparatov; (Teoriya i analiz) [Safety of flights of aircraft; (Theory and Analysis)]. Moscow, Transport Publ., 224 p. (In Russian).
8. *Pavlova S.V.* (2005) Topologichna otsinka funktsional'nosti yakosti kerovanoyi aerodynamichnoyi systemy litaka [Topological estimation of aerodynamic controlled airplane system functionality of quality]. *Visnyk Natsional'noho aviatsiynoho universytetu*, no. 1, pp. 48–54. (in Ukrainian).
9. *Pavlova S., Komar M.* (2016) The Invariant Adaptation of the Aircraft Control System in Emergency Situation During the Flight. *Proceeding of the National Aviation University*, no. 4(69), P. 28–33.



Внимание !

**Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.**

В розничную продажу журнал не поступает.

Подписной индекс 71008